



A interação solo-estrutura e sua aplicação na análise de estruturas de edifícios

Sumário

Introdução	2
1 - Causas que originam o cálculo do sistema estrutura-fundação-solo de forma separada	3
2 - Fatores que influenciam na interação solo-estrutura	6
3 - Comportamento do sistema solo-estrutura	9
4 - Como modelar a interação solo-estrutura em função do tipo de fundação	10
5 - Fundações superficiais	11
6 - Fundações profundas	14
7 - A interação solo-estrutura e os softwares de análise ..	15
Conclusão	24



Por: **Socrate Muñoz Iglesia** | Engenheiro Civil

Introdução

Tradicionalmente os engenheiros calculam o sistema estrutura-fundação-solo de forma separada. Um projeto estrutural convencional geralmente se desenvolve em duas etapas: a primeira, onde se considera a estrutura sob apoios indeslocáveis - rótulas ou engastes perfeitos - na qual se obtém os carregamentos que irão atuar na fundação; e na segunda, esses esforços são utilizados pelo engenheiro geotécnico ou pelo próprio engenheiro estrutural que projeta as fundações, mas nem sempre isso é o correto.

Para nos aprofundarmos nesse assunto, convido você a continuar lendo este e-book sobre a interação solo-estrutura e sua aplicação na análise de estruturas de edifícios.

Boa leitura!



1. Causas que originam o cálculo do sistema estrutura-fundação-solo de forma separada

Dificuldade de cálculo



Existe uma dependência mútua entre os esforços interiores e o dimensionamento da estrutura e suas fundações. Os deslocamentos e as tensões geradas no solo pela fundação dependem de suas dimensões e esforços, os esforços na estrutura dependem também dos deslocamentos do solo embaixo da fundação e, ao mesmo tempo, o dimensionamento da fundação depende dos esforços provenientes da estrutura e das propriedades do solo.



Modelos de cálculo complexos

As estruturas de edifícios são combinações de barras e placas. Porém, o solo é um meio “contínuo”, muitas vezes estratificado. Assim, o modelo de cálculo deve ser uma combinação de elementos de barras e elementos superficiais ou volumétricos. A possibilidade de construir um modelo com essas características não sempre está disponível nos programas de cálculo.



A resposta do solo é não linear, incluso para níveis baixos de esforços, e se modifica de forma importante no tempo



Pouca interação

Entre engenheiros geotecnistas e estruturais durante o trabalho de projeto.



Falta de informações suficientemente confiáveis sobre o solo

O solo é um meio com propriedades físicas e mecânicas muito variáveis e de difícil determinação.

A interação solo-estrutura (ISE) avalia a resposta conjunta de três sistemas fortemente interligados: a estrutura, a fundação, e o solo.

A aplicação prática da ISE costuma esbarrar pelo escasso entendimento dos seus princípios fundamentais, a dificuldade para entender a literatura relacionada como o tema e o limitado tratamento nos códigos e normas de desenho estrutural. As figuras 1 e 2 mostram os modelos de cálculo tradicional e com ISE para o caso de fundações superficiais.

A figura 2 mostra dois tipos de modelos comumente utilizados para a consideração da ISE. Em um primeiro modelo, mais simples, o solo é substituído por um sistema de molas com comprimento zero e propriedades elásticas equivalentes ao solo. No segundo modelo, o solo é considerado um meio contínuo discretizado mediante elementos finitos, bi ou tridimensionais, onde é possível inclusive simular a estratificação do solo e outros efeitos como a redistribuição de tensões geradas pela escavação e/ou o pré-esforço, no caso de paredes diafragma (ver fig 3).

Nos modelos baseados em molas equivalentes (Fig. 2), a rigidez das molas pode ser determinada utilizando a teoria do semi-espelho elástico ou um modelo isolado do solo discretizado com elementos finitos. Programas como o SIGMA do pacote GeoStudio ou Plaxis permitem fazer isso, considerando também os modelos de comportamento não-linear do solo.

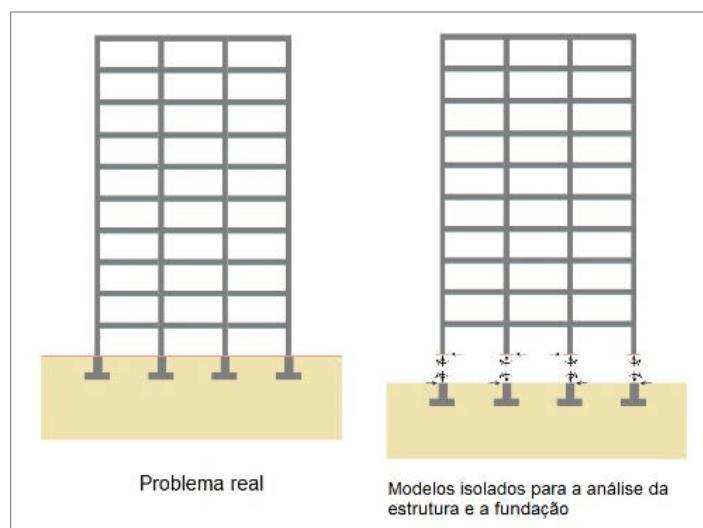


Figura 1 - Problema real e modelos de cálculo tradicionais

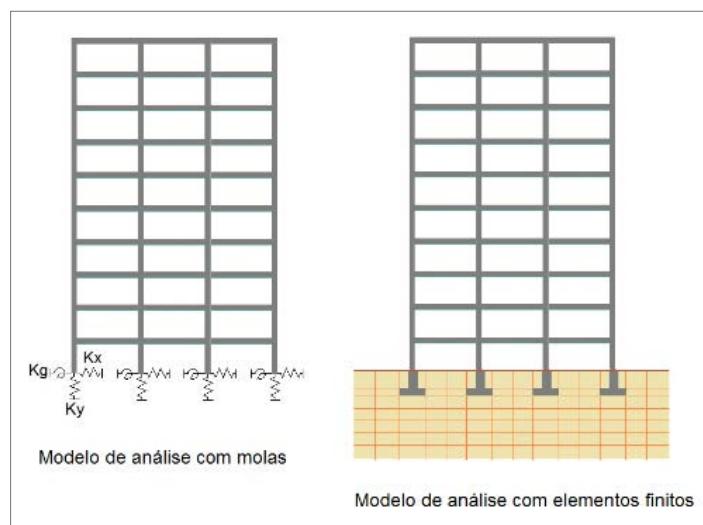


Figura 2 - Modelos de cálculo considerando a ISE

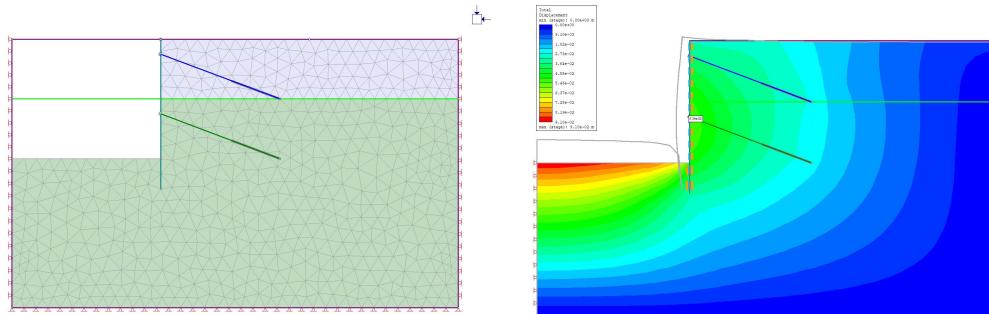
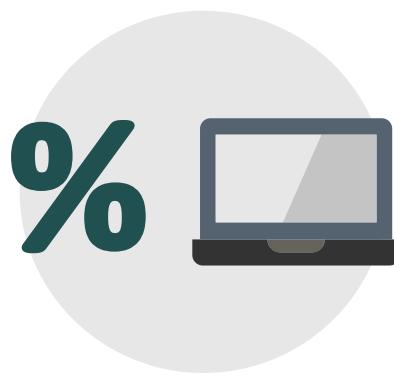


Figura 3 - ISE: parede ancorada mediante pré-esforço. Análise mediante MEF.

A consideração da flexibilidade da fundação e o solo podem alterar significativamente a resposta estrutural estática e dinâmica. Além disso, é preciso considerar que o efeito P-delta, no caso de estruturas com carregamento lateral construídas em solos muito flexíveis pode ter incrementos significativos. Deve-se tomar especial atenção com os seguintes aspectos:

- Decidir se a análise deve ser linear ou não;
- A determinação correta das propriedades das molas e se devem existir acoplamento entre essas propriedades;
- Caso seja utilizado um modelo de elementos finitos para o solo, definir as propriedades desses elementos, os limites laterais e em profundidade do solo a considerar e as condições de fronteira.
- Na análise dinâmica, a consideração da massa do solo, o amortecimento e o cálculo de seus deslocamentos e acelerações no lugar da obra são também uma fase muito importante para o projeto estrutural.
- A seleção do modelo de cálculo deve ser feita segundo a relação entre a rigidez da estrutura, a fundação e o solo.



2. Fatores que influenciam na interação solo-estrutura

A ISE é um fenômeno complexo, gerado por vários fatores:

Número de pavimentos



Se ele aumenta, o efeito da ISE diminui até ser quase desprezível. Os momentos fletores dos elementos estruturais nos primeiros pavimentos são maiores e diminuem na medida em que se aumenta o número de andares. Os primeiros andares apresentam uma maior rigidez, sem apresentar comportamento linear ao longo da edificação.

O processo construtivo



Com o aumento do número de andares, a estrutura vai se tornando mais rígida verticalmente. Esse aumento não é linear em relação ao número de pavimentos. Por isso ocorre uma redistribuição de cargas nas fundações e na construção de cada pavimento.



Edificações vizinhas

Ao se considerar o grupo de edifícios, percebe-se um maior recalque. Ele tende a aumentar significativamente ao se diminuir as distâncias. A interação solo-estrutura diminui quando se aumenta as distâncias entre as edificações.



Rigidez relativa entre a estrutura e o solo

Esse fator determina o desempenho da construção em relação aos recalques total e diferencial. Os recalques diminuem com o aumento da rigidez relativa entre o solo e a estrutura. Os recalques diferenciais são mais sensíveis a esta relação do que os recalques totais. O uso de cintas tende a uniformizar os recalques e sua ação diminui na medida em que os pavimentos vão sendo construídos. A cinta impõe maior rigidez à estrutura de forma global e diminui com o aumento dos pavimentos.



Forma em planta do edifício

A forma em planta das edificações pode uniformizar ou não os recalques, principalmente em estruturas flexíveis. Esta tendência é mais acentuada em plantas compactas ou com forma aproximadamente quadrada.



Tipo de análise

Existe uma diferença significativa na ISE se a análise realizada é estática ou dinâmica, especialmente no caso da carga sísmica.



Resposta estrutural

Muitos engenheiros acreditam que a ISE incrementa a resposta estrutural. Isso não é verdade. Em algumas situações, pode ser benéfica para a estrutura, diminuindo a resposta. A resposta sísmica pode ser maior ou menor como resultado da ISE. Mesmo que os deslocamentos totais do sistema sejam incrementados, a distorção estrutural pode diminuir porque uma parte dela é concentrada na fundação.

Que fatores afetam a ISE dinâmica?

Mesmo que o Brasil não tenha fortes atividade sísmica, é importante estudar a ISE dinâmica. Afinal, existem outras cargas com natureza dinâmica. Em termos gerais os fatores que a afetam são:

- **Características da superestrutura:** altura e número de pavimentos, peso total e massa, rigidez lateral, relação de esbeltez, amortecimento;
- **Características da fundação:** tipo, forma, profundidade, dimensões e rigidez;
- **Características do solo:** propriedades dinâmicas, profundidade e estratigrafia, intensidade e conteúdo de frequência do movimento sísmico;
- **Características do movimento do terreno.**

O movimento na base de uma estrutura apoiada em rocha é praticamente igual se a estrutura não estivesse construída. Por isso, a análise pode ser feita como se a base estivesse perfeitamente engastada.

No caso de estruturas apoiadas em solo flexível, o movimento na base é diferente. Analisaremos a seguir diferentes situações que se podem apresentar no caso de atuar a carga de sismo.

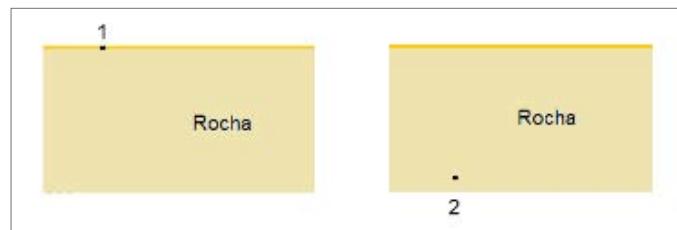


Figura 4 - Efeito da profundidade

O movimento no ponto 2 é ligeiramente menor que no ponto 1. A diferença é pequena — geralmente é desprezível.



Figura 5 - Efeito de solo flexível

O movimento no ponto 1 é ligeiramente diferente do ponto 2. A diferença também é pequena — também costuma ser desprezível.

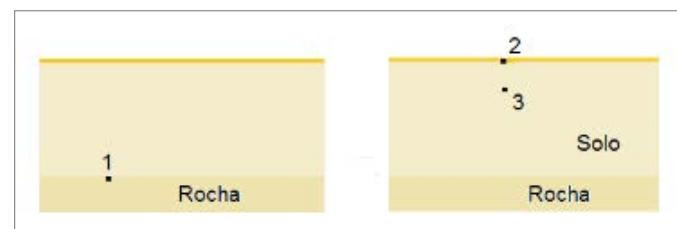


Figura 6 - Efeito de sítio

O movimento no ponto 1 é diferente dos pontos 2 e 3 por causa da resposta dinâmica do solo flexível acima da rocha. Quanto mais flexível, maior a modificação do movimento — o que se conhece como **resposta de sítio**.

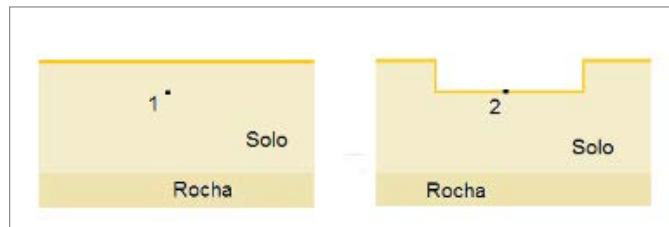


Figura 7 - Efeito da escavação

O movimento no ponto 2 é modificado pela escavação feita para construir a fundação.

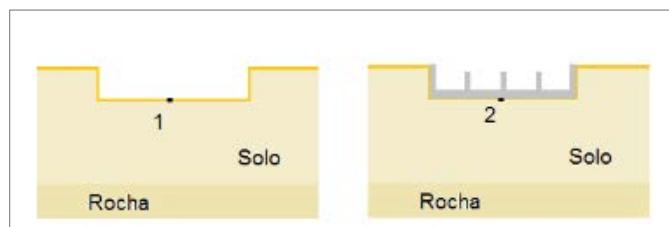


Figura 8 - Efeito da interação cinemática

O movimento no ponto 1 (fig. 8.) é modificado pela escavação feita para construir a fundação. Como a rigidez da fundação é maior que a do solo, ele não poderá se deformar (no ponto 2) da mesma forma que sem a fundação — efeito conhecido como **interação cinemática** — mais notável quanto maior é a relação entre as rigidezes da fundação e o solo.



Figura 9 - Efeito da interação inercial.

O movimento na base da estrutura no ponto 1 (fig.9) é modificado pela presença e movimento da estrutura (ponto 2). Esse comportamento é chamado de **interação inercial** porque é resultado das forças de inércia que atuam na massa da estrutura. Geralmente essa interação é mais importante que a cinemática. A interação inercial é maior de acordo com:

- A flexibilidade do solo;
- A flexibilidade do solo;
- E o quanto maiores sejam a massa e a esbeltez da estrutura.

O sistema dinâmico torna-se mais flexível e, portanto, o período aumenta, mudam as formas modais de vibração e aumenta o amortecimento.

3. Comportamento do sistema solo-estrutura

Para mostrar a diferença entre a análise tradicional e considerando a ISE, vamos para um exemplo. O primeiro caso tem rigidez infinita na base, ou seja, o caso em que não existem as molas. *Fundação rígida* refere-se ao caso em que os elementos da fundação tem rigidez infinita e *base fixa* refere-se à combinação de elementos de fundação muito rígidos com uma *base rígida*.

A *base flexível* considera a deformação tanto dos elementos da fundação como do solo.

Consideremos uma estrutura de um grau de Liberdade com rigidez, k , massa m , apoiada em uma *base fixa* (figura 10a). A força estática, F , causará o deslocamento, Δ :

$$\Delta = F/k \quad (4)$$

A frequência natural, ω , e o período, T , das vibrações não amortecidas são:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5)$$

Substituindo a equação (4) em (5) temos:

$$T^2 = (2\pi)^2 \frac{m}{(\frac{F}{\Delta})} = (2\pi)^2 \frac{m\Delta}{F} \quad (6)$$

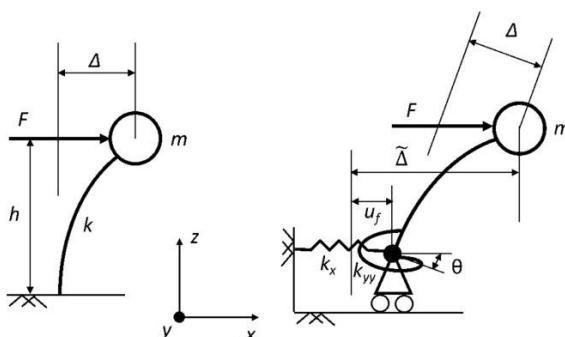


Figura 10 - Flexão e Deslocamentos causados pela força aplicada: a) estrutura de base fixa; b) estrutura com molas vertical, horizontal, e rotacional na base

Considere a mesma estrutura com molas nas direções vertical, horizontal e de rotação na base para representar a flexibilidade do solo contra uma fundação rígida (fig 10b). A rigidez da mola na direção vertical será k_z , na direção horizontal k_x . A rigidez e a rotação com relação ao eixo Y será k_{yy} . Se a força, F , é aplicada na massa m na direção x, a estrutura se flexionará, do mesmo forma que no caso de base fixa. O cortante na base, F provocará o deslocamento u_f , e o momento na base (Fh) provocará o giro, θ , na mola rotacional. O deslocamento total, Δ , no topo da estrutura será:

$$\begin{aligned}\tilde{\Delta} &= \frac{F}{k} + u_f + \theta \cdot h \\ \tilde{\Delta} &= \frac{F}{k} + \frac{F}{k_x} + \left(\frac{F \cdot h}{k_{yy}}\right) \cdot h \quad (7)\end{aligned}$$

Observe que o deslocamento lateral é maior do que no caso da base fixa, esse aumento dos deslocamentos laterais incrementa o efeito P-Delta. Se a equação (7) é substituída na (6), obtemos o período para o caso de base flexível:

$$T^2 = (2\pi)^2 \frac{m\tilde{\Delta}}{F} = (2\pi)^2 m \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_x} + \frac{h^2}{k_{yy}} \right) \quad (8)$$

Observe que este período também é maior que o período calculado considerando a base rígida

Combinando (8) e (5) :

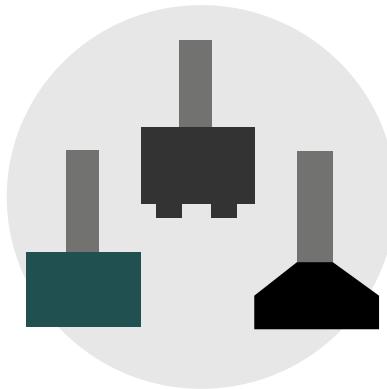
$$\left(\frac{\tilde{T}}{T} \right)^2 = \frac{k}{m} m \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_x} + \frac{h^2}{k_{yy}} \right) \quad (9)$$

A equação (9) pode ser simplificada para obter o alongamento do período por causa da flexibilidade da base (Veletsos and Meek, 1974):

$$\frac{\tilde{T}}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_x} + \frac{kh^2}{k_{yy}}} \quad (10)$$

4. Como modelar a interação solo-estrutura em função do tipo de fundação

A maioria dos programas de análise focados no projeto estrutural permitem definir apoios elásticos, mas nem todos têm a possibilidade de construir um modelo onde se combinam elementos finitos de barras com elementos superficiais ou sólidos.



Geralmente é possível definir, no caso dos apoios, seis constantes elásticas correspondentes aos seis possíveis graus de liberdade do nó. Esta funcionalidade é mais simples para definir o solo, mas a definição da rigidez adequada das molas não é um problema de baixa complexidade. Esta rigidez pode ser determinada utilizando um modelo do solo separado da estrutura, para o qual pode ser utilizado qualquer dos numerosos softwares disponíveis no mercado: PLAXIS, GeoStudio, ABAQUS, ANSYS ou SAP2000. Também existe a possibilidade de utilizar a teoria do espaço elástico semi-infinito.

Seja qual for o método utilizado, é muito importante considerar a natureza da carga pois o comportamento do sistema superestrutura-fundação-solo pode ser bem diferente se a carga é estática ou dinâmica. A seguir apresentaremos algumas considerações da FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA 273).

5. Fundações superficiais

É bem conhecido que o comportamento carga-deformação das fundações é não linear por causa:

- Das dificuldades para determinar as propriedades do terreno e as cargas estáticas nas fundações de edifícios existentes
- E a provável variabilidade dos solos que servem de apoio às fundações

Por isso, recomenda-se uma representação elasto-plástica equivalente do comportamento carga-deformação.

Esta variabilidade e indeterminação precisa de limites superior e inferior para definir a rigidez e a capacidade (Figura 11a) para permitir a avaliação da sensibilidade à resposta estrutural.

Para determinar os limites superior e inferior mostrados na Figura 11a, em ausência de um estudo geotécnico, a rigidez do limite superior das fundações retangulares deve ser duas vezes o módulo de cortante efetivo, G . A rigidez do limite inferior deve ser a metade do módulo de cortante efetivo, assim que o rango de rigidez deverá ser um fator de quatro desde o limite inferior ao superior.

Muitas das fundações superficiais isoladas são rígidas com relação ao solo onde se apoiam. Para uma análise simplificada é possível usar um modelo de molas desacopladas, como mostra a Figura 11b. As três constantes equivalentes das molas podem ser determinadas usando soluções teóricas convencionais para placas rígidas apoiadas em um médio elástico semi-infinito.

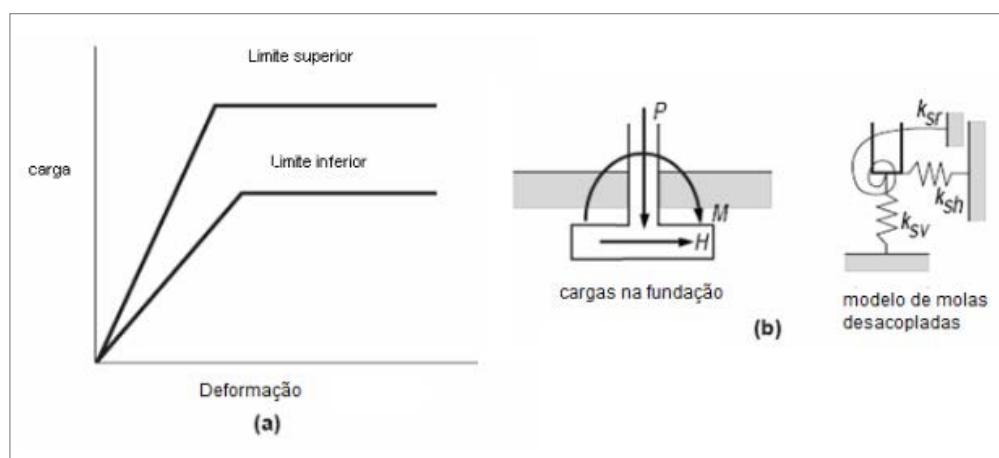
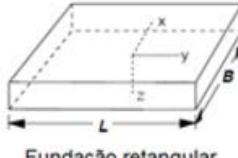
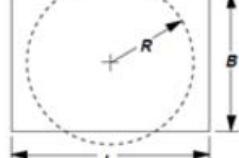


Figura 11 - a) Comportamento elasto-plástico idealizado da relação carga - deformação;
b) Modelo de molas desacopladas para fundações rígidas

A Figura 12 apresenta soluções de rigidez para placas retangulares em função de um raio circular equivalente.



Fundação retangular



Fundação circular equivalente

Graus de liberdade				
	Translação	Rotação		Torção
		eixo X	eixo Y	eixo Z
Raio equivalente, R	$(\frac{B L}{\pi})^{1/2}$	$(\frac{B L^3}{3 \pi})^{1/4}$	$(\frac{B^3 L}{3 \pi})^{1/4}$	$[\frac{B L (B^2 + L^2)}{6 \pi}]^{1/4}$

Figura 12 - Raio da fundação equivalente para fundação retangular

As constantes elásticas das molas podem-se definir na forma:

$$k = \alpha \beta k_o \quad (1)$$

Sendo:

- α : fator de correção da forma
- β : fator de profundidade
- k_o : coeficiente de rigidez para a fundação circular obtido da tabela seguinte:

Graus de liberdade	k_o
Translação vertical	$\frac{4 G R}{1 - v}$
Translação horizontal	$\frac{8 G R}{2 - v}$
Torção	$\frac{16 G R^3}{3}$
Rotação	$\frac{8 G R^3}{3(1 - v)}$

Tabela 1- v = coeficiente de Poisson

A rigidez se ajusta para a forma y profundidade usando fatores similares aos mostrados nas figuras 13 e 14 respectivamente.

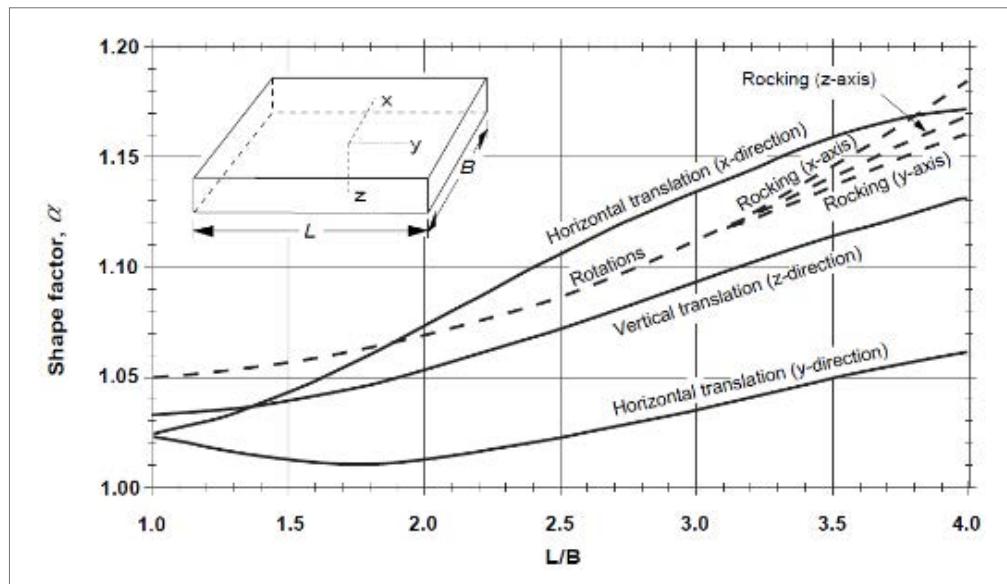


Figura 13 - Fator de forma para a correção da rigidez

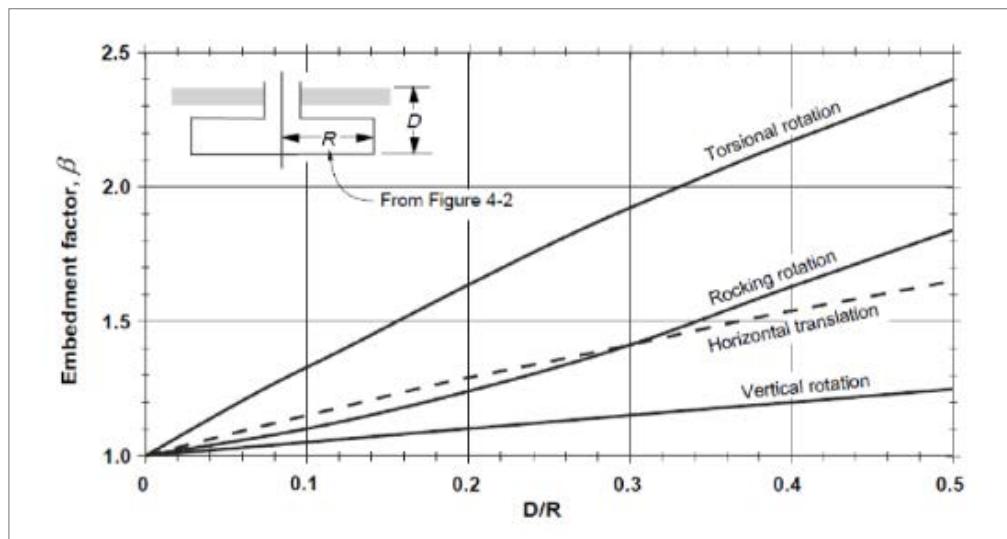


Figura 14 - Fator de profundidade para a correção da rigidez

Se os lados da base estão contado com um solo bem compactado deve-se assumir uma rigidez adicional por causa da pressão passiva. Esta correção é apresentada na fig. 15.

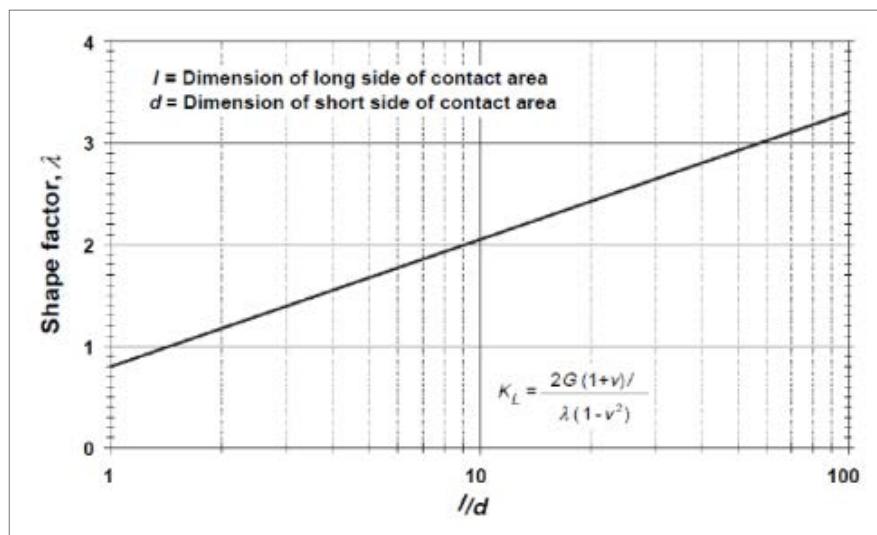


Figura 15 - Rígidez lateral da Fundação considerando a pressão passiva

6. Fundações profundas

O modelo de cálculo pode ser novamente obtido utilizando a formulação de molas equivalentes. A rígidez das molas é determinada pelo coeficiente de recalque horizontal ou a teoria do espaço elástico semi-infinito. Uma alternativa, como se indicou antes, é realizar um modelo separado da fundação em um software de elementos finitos e determinar as seis constantes elásticas das molas. No FEMA 273 é apresentado um modelo do tipo, onde a rígidez axial k_{sv} do grupo de estacas pode variar em um range definido por:

$$k_{sv}^{\inf} = \sum_{n=1}^N \frac{0.5 A E}{L} \quad k_{sv}^{\sup} = \sum_{n=1}^N \frac{2 A E}{L} \quad (2)$$

Para a rígidez de rotação:

$$k_{sr} = \sum_{n=1}^N k_{vn} s_n^2 \quad (3)$$

Sendo:

A = área da seção transversal de uma estaca

E = Módulo de elasticidade das estacas

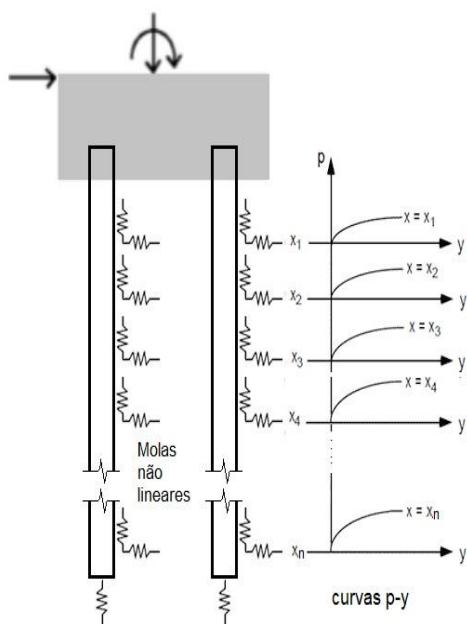
L = comprimento das estacas

N = Número de estacas no grupo

k_{vn} = rígidez Axial da enésima estaca

s_n = distância entre a enésima estaca e o eixo de rotação

Se as estacas contribuem significativamente com a rigidez lateral, é possível usar modelos com molas horizontais igualmente espaçadas no comprimento das estacas (Fig. 16). Um comportamento somente em compressão e não linear das molas só será possível utilizando um processo iterativo de análise.



Método p-y

O método p-y é um modelo numérico que simula o solo como molas não lineares, onde p é a pressão no solo por unidade de comprimento da estaca e y é o deslocamento da estaca. O solo é representado por uma série de curvas não lineares p-y que variam com a profundidade e tipo de solo.

A curva p-y para um ponto particular em uma fundação depende de vários fatores, entre eles:

- Tipo de solo
- Tipo de carga (estática ou dinâmica, monotonica, cíclica ou combinações destas)
- Diâmetro da fundação e forma da seção transversal
- Coeficiente de atrito entre a fundação e o solo
- profundidade do ponto com relação à superfície do solo
- Condições de contorno
- Método de construção da fundação
- Efeitos de Interação do grupo de estacas

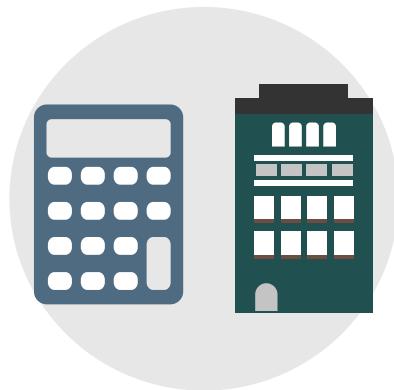
A influencia destes fatores ainda está em estudo, pelo que tem sido necessário desenvolver curvas p-y empíricas e verificando estes modelos com provas de carga em fundações a escala natural.

Figura 16 - Modelo de fundação profunda. Método p-y. O solo é substituído por molas equivalentes

7. A interação solo-estrutura e os softwares de análise

A relação de rigidez entre as partes do sistema superestrutura-fundação-solo e a natureza da carga (estática ou dinâmica) definem se a ISE deve ou não ser levada em consideração.





Se considerarmos a complexidade dos modelos, as dificuldades de cálculo são tais que não resulta prático um cálculo manual. Por outro lado, as diferenças em relação ao cálculo tradicional (sem considerar ISE) podem ser notáveis. O efeito P-delta pode ser incrementado significativamente e a resposta dinâmica também pode ser alterada de forma importante.

Diante disso, a utilização de um software com possibilidade de considerar a ISE na análise de forma automática parece ser a opção indicada. Analisaremos a seguir como consideram a ISE três dos programas disponíveis no mercado.

SAP 2000

O software é completamente geral e permite a modelação do sistema estrutura-fundação-solo de conjunto. Para o modelo do solo podem ser utilizados molas (springs) com comportamento linear ou elementos com comportamento linear ou não linear que podem trabalhar somente em compressão. Nestes elementos também se pode definir comportamento plástico e amortecimento.

O programa permite definir elementos superficiais apoiados sobre o terreno modelado com molas. O coeficiente elástico da mola pode ser definido diretamente nos nós ou por unidade de área. Neste caso o SAP 2000 distribui automaticamente as molas associadas com a área para os nós localizados nos vértices do elemento de superfície.

O mesmo acontece com os elementos lineares onde pode ser definida uma rigidez das molas por unidade de comprimento. O sistema disponibiliza também elementos superficiais que trabalham no estado de deformação plana. Eles permitem fazer modelos de interação solo-estrutura em 2D e elementos finitos de tipo SOLID que viabilizam a modelação de problemas em 3D. A análise pode ser estática ou dinâmica, linear ou não linear.

Eberick

O programa permite definir modelos de trabalho conjunto estrutura-fundação-solo para o caso de fundações superficiais tipo sapata, lajes de radier, estacas e tubulões. Nas fundações superficiais isoladas (tipo sapata) devem ser definidos os coeficientes elásticos de translação e rotação das molas. O processo iterativo descrito não é automatizado, mas pode ser feito sem dificuldade e converge muito rapidamente.

Na documentação do **Eberick** é indicado que o modelo utilizado para cálculo dos esforços no radier se baseia na hipótese de que o elemento é apoiado sobre base elástica, em que a placa é substituída por uma malha (grelha) sobre apoios elásticos equivalentes. Neste modelo a base é obtida a partir das características do solo e o seu comportamento é baseado na hipótese de Winkler. Os coeficientes de recalque vertical e horizontal do solo devem ser definidos de acordo com estudos geotécnicos no solo existente no local da obra. O solo é modelado por molas distribuídas continuamente ao longo da superfície do elemento, e as pressões de contato são proporcionais aos recalques, até ser atingida a pressão que leva a plastificação do solo.

$$ps = kv \cdot d$$

Onde kv é o coeficiente de reação vertical do terreno, e d a deflexão vertical no ponto considerado.

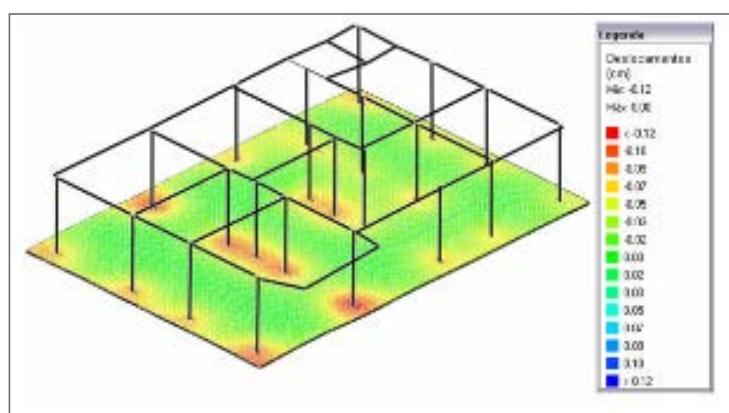


Figura 17 - Deslocamentos no radier após uma análise de ISE no Eberick

Os tubulões são modelados com molas em meio elástico. Deve ser definido o coeficiente de recalque vertical do solo e o coeficiente de Poisson de cada camada do solo. O Eberick multiplica o coeficiente de recalque vertical pelo coeficiente de Poisson para obter o coeficiente de recalque horizontal. Esse multiplicado pelo valor da discretização e pela contribuição do solo, fornece o coeficiente de mola, que representa a rigidez do material no entorno do fuste do tubulão.

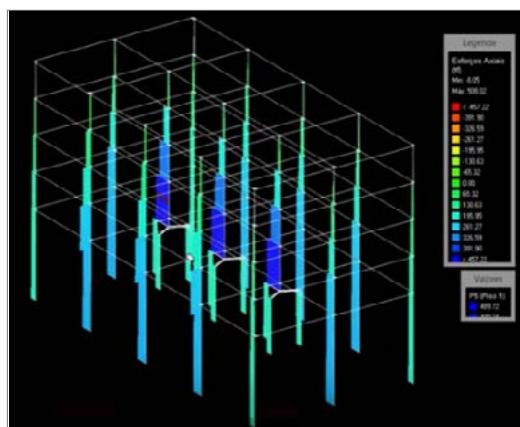


Figura 18 - ISE no Eberick. Esforços axiais em uma estrutura suportada por tubulões.

Exemplos de interação solo-estrutura utilizando o Eberick

Exemplo 1: Tipo de fundação Laje de radier

- Estrutura de 5 pavimentos.
- Pilares 30x40 cm, vigas 30x45 cm, vãos de 4.00 m em X e Y, laje de radier de 20 cm de espessura, lajes de 12 cm de espessura. Carga acidental de 150 kg/m². Coeficiente de recalque vertical utilizado: 5000 Tn/m³. São analisados dois modelos:
- Estrutura apoiada na laje de radier, o solo se considera flexível.
- Estrutura apoiada em base fixa (fundação e o solo rígido).

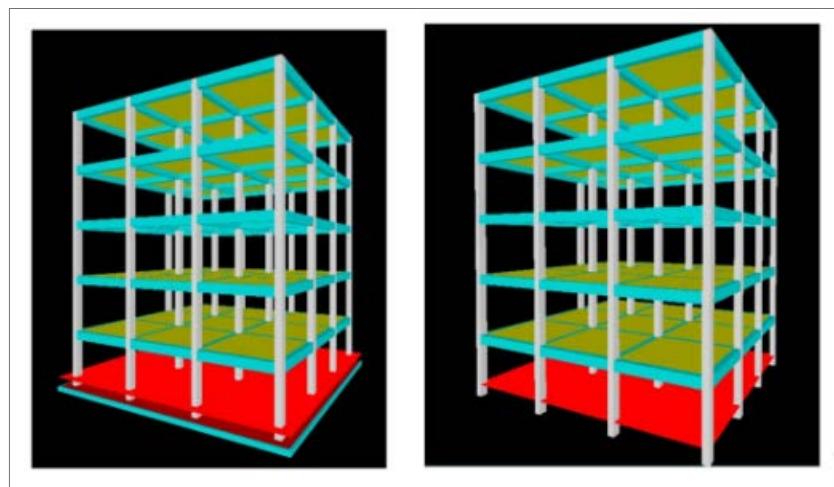


Figura 19 - Modelos de cálculo analisados

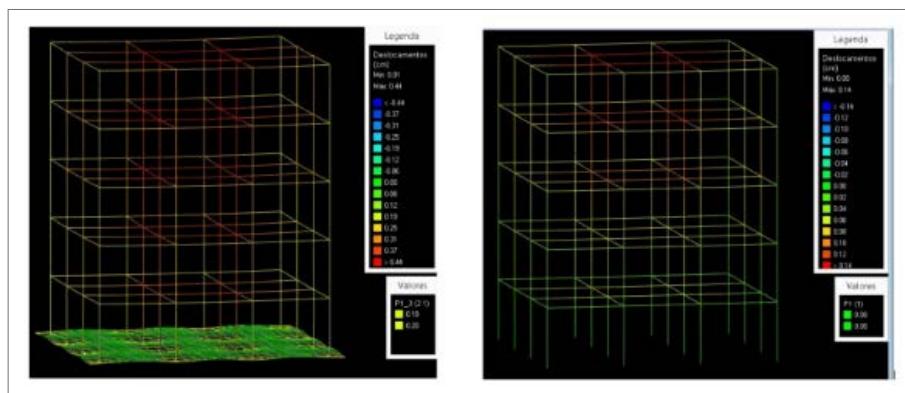


Figura 20 - Deslocamentos (cm) nos modelos para a combinação G1+G2+0.6Q

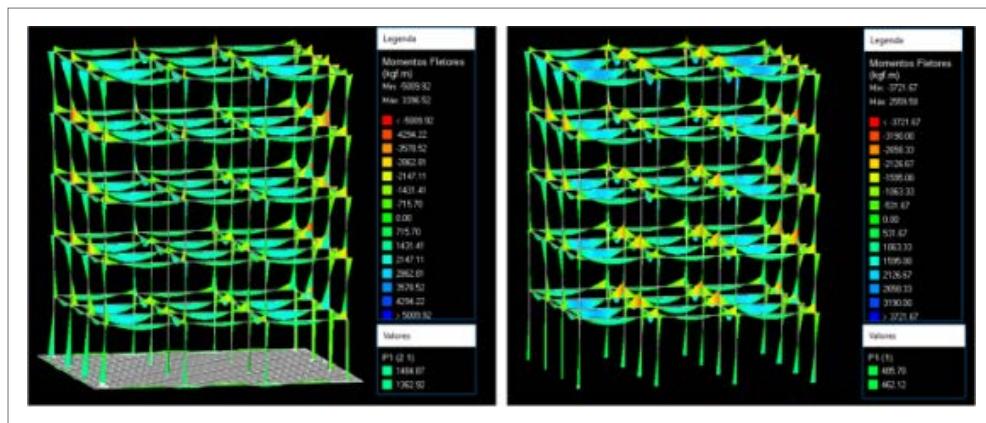


Figura 21 - Momentos fletores (kg·m) para a combinação 1.3G1+1.4G2+1.4Q+0.84V1

Como ponto de comparação se tomou a base do pilar do canto frontal esquerdo. Observe a diferença entre os deslocamentos e os momentos fletores dos modelos na tabela seguinte.

Modelo	Deslocamentos (cm)	Momentos fletores (kg·m)
ISE	-0.20 cm	1484.87
Base fixa	0.00 cm	485.70

Tabela 2 - Deslocamento e momentos fletores

Exemplo 2: Tipo de fundação Sapatas isoladas

Analisa-se a mesma estrutura do exemplo 1. Coeficiente de recalque: $k_v = 4000000 \text{ kg/m}^3$.

- Coeficiente de rigidez da mola à translação na direção Z

$$k_z = k_v \cdot A_{base}$$

- Coeficiente de rigidez da mola à rotação giro em torno de X

$$k_x = k_v \cdot I_x$$

- Coeficiente de rigidez da mola à rotação giro em torno de Y

$$k_y = k_v \cdot I_y$$

Dimensões iniciais das bases das Sapatas (m)	$k_x = k_y = k_z$ (kg/m)	$k_{rx} = k_{ry}$ (kg·m/rad)
1.25x1.25	62250000	813802.1
1.5x1.5	9000000	1687500
1.95x1.95	15210000	4819669

Tabela 3 - Cálculo dos coeficientes de rigidez das molas

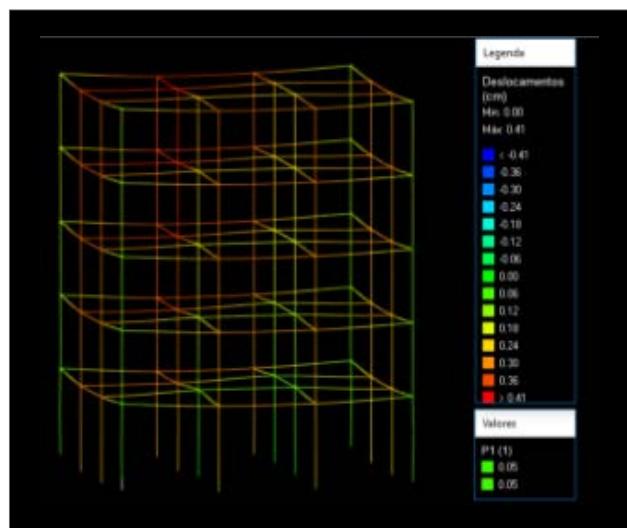


Figura 22 - Deslocamentos (cm) para a combinação G1+G2+0.6

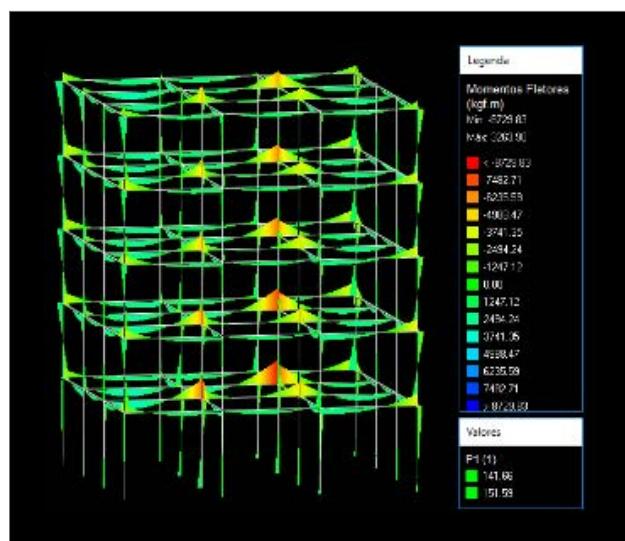


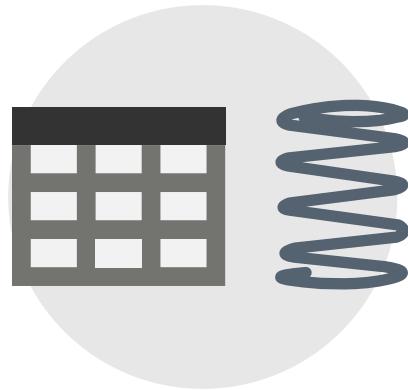
Figura 23 - Momentos fletores (kg·m) para a combinação 1.3G1+1.4G2+1.4Q+0.84V1

Deslocamentos e momentos fletores na base do pilar do canto frontal esquerdo.

Modelo	Deslocamentos (cm)	Momentos fletores (kg·m)
ISE	-0.05 cm	141.66
Base fixa	0.00 cm	485.70

Tabela 4 - Deslocamentos e momentos fletores na base do pilar

O processo de cálculo deve ser iterativo, pois os coeficientes das molas dependem das dimensões da fundação e estas dependem da rigidez atribuída às molas. Assim, os coeficientes de rigidez das molas devem ser recalculados em cada iteração em função das dimensões das bases obtidas, repetindo o processo até que não exista variação importante nas dimensões das bases ou nos valores de rigidez das molas. O processo converge muito rapidamente, quase sempre em 3 - 4 iterações no máximo. No exemplo analisado na segunda iteração já as dimensões das bases são quase as mesmas da iteração inicial, por tanto, os coeficientes de molas assumidos podem ser aceitos. Observe na tabela acima a diferença entre os valores dos deslocamentos e momentos fletores na base do pilar do canto frontal esquerdo considerando e sem considerar a ISE.



Exemplo 3: Tipo de fundação - Tubulões

- Coeficiente de recalque vertical 2000 Tn/m³, coeficiente de Poisson 0.3, coeficiente de recalque horizontal 600 Tn/m³, diâmetro do tubulão 60 cm.

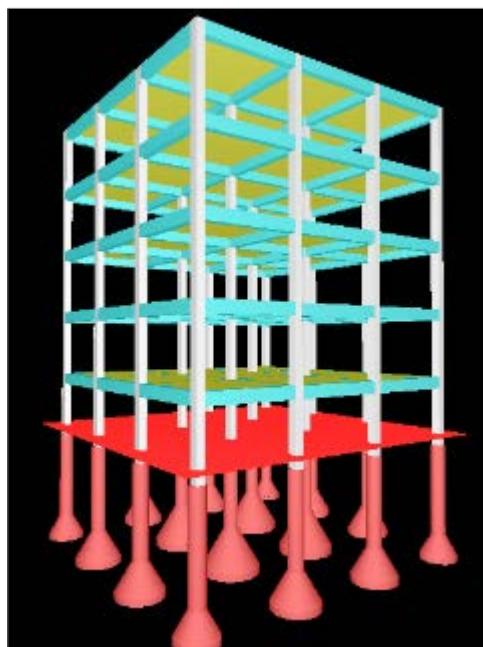


Figura 24 - Momentos fletores (kg·m) para a combinação 1.3G1+1.4G2+1.4Q+0.84V1

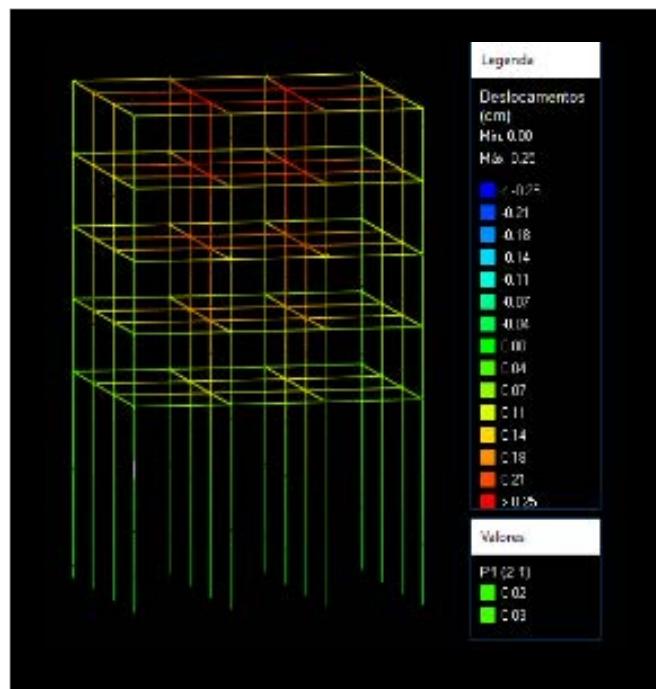


Figura 25 - Deslocamentos para a combinação $G1+G2+0.6Q$

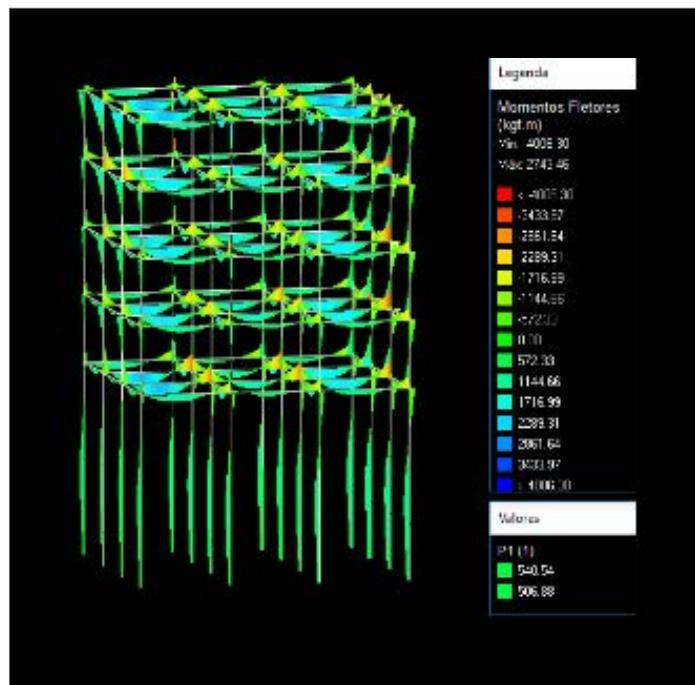


Figura 26 - Momentos fletores para a combinação $1.3G1+1.4G2+1.4Q+0.84V1$

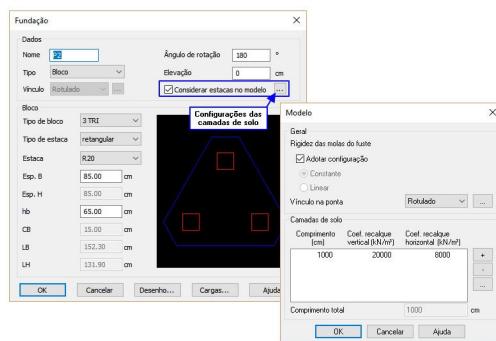
Deslocamentos e momentos fletores na base do pilar do canto frontal esquerdo.

Modelo	Deslocamentos (cm)	Momentos fletores (kg·m)
ISE	-0.03 cm	550.54
Base fixa	0.00 cm	485.70

Tabela 5 - Deslocamentos e momentos fletores na base do pilar

Estacas no modelo de análise estrutural

No Eberick é possível considerar, para a análise da edificação, a presença das estacas no modelo estrutural lançando o bloco de fundação com geometria fixa.



Para considerar a fundação com estacas no modelo, devemos marcar a opção "Considerar estacas no modelo". Neste mesmo diálogo, no botão [...], será possível configurar o modelo das estacas definindo a rigidez das molas no fuste, o vinculo na ponta e as camadas do solo. A rigidez das molas pode ser constante ou variável com a profundidade.

Com isso, as estacas serão consideradas no modelo estrutural, como é mostrado na fig. 28.

Figura 27 - Diálogos para configurações das estacas e o solo.

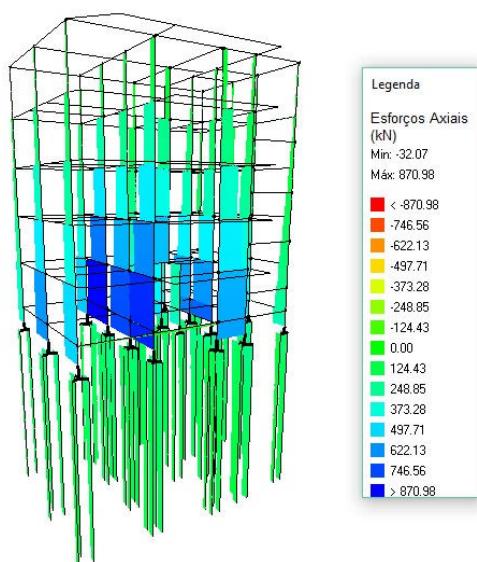


Fig. 28 - Esforços Axiais na estrutura considerando as estacas no modelo.

Exemplo 4: Tipo de fundação – Blocos de fundação

Edificação de quatro pavimentos (140 m^2 por pavimento). Em duas laterais da edificação, apenas no primeiro pavimento, tem parede de contenção. Estacas de 12 metros comprimento.

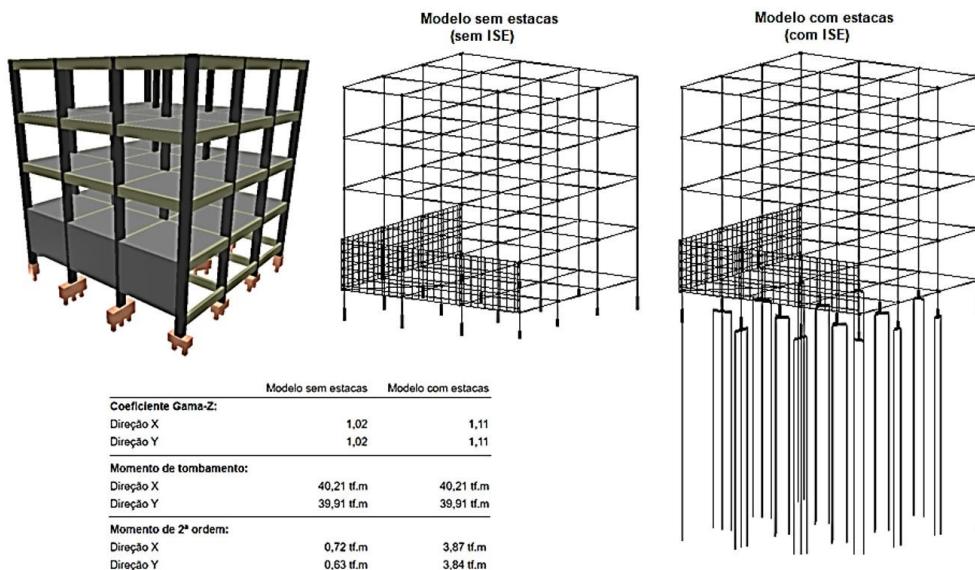


Figura 26 - Comparação da estabilidade global sem e com ISE

Neste caso, veja que a consideração da ISE faz com que, o modelo que antes poderia ser considerado de nós fixos ($\gamma z < 1,10$) agora deva ser considerado como de nós móveis ($\gamma z > 1,10$), tornando a análise dos esforços de segunda ordem (processo P-Delta) obrigatória para esta estrutura.

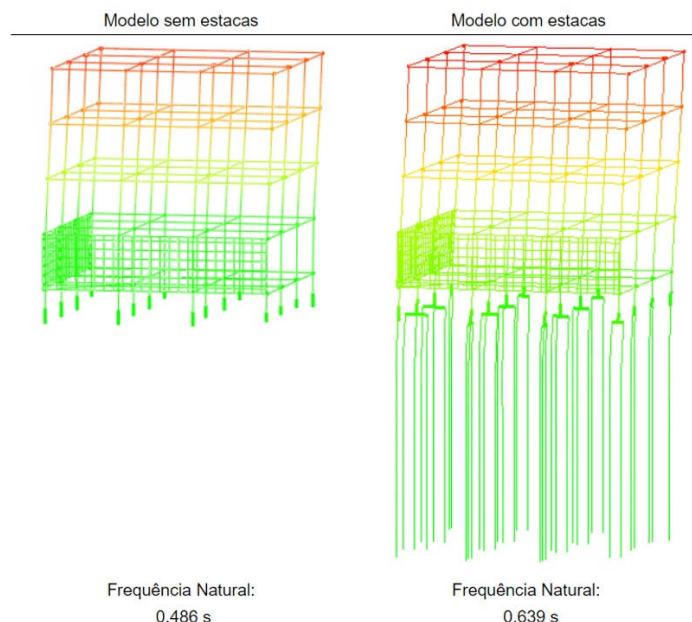


Figura 26 - Período de vibração do modo fundamental sem e com ISE.
fonte: <https://suporte.altoqi.com.br>

CAD TQS

O sistema conta com o módulo SISES/TQS. A filosofia básica do SISES/TQS consiste no seguinte:

O modelo básico lançado pelo engenheiro estrutural é passado ao engenheiro geotécnico que alimenta no sistema diversas sondagens realizadas no terreno. São selecionados os tipos de fundações mais adequados para o projeto e estas são pré-dimensionadas pelo engenheiro geotécnico. São selecionados critérios de projeto para a simulação da presença do solo junto aos elementos de fundação. A seguir, o SISES/TQS cria um novo modelo estrutural da fundação contendo toda a superestrutura, em conjunto com os elementos de fundação, discretizados convenientemente e com a influência do solo já integrada. Esse novo modelo é resolvido e o engenheiro geotécnico analisa os resultados para todas as condições de carregamentos para verificar a adequação dos elementos de fundação adotados com as tensões de ruptura, a capacidade de carga do solo e os recalques máximos mobilizados, se necessário, são realizados ajustes nos elementos da fundação e o processo é refeito até que a solução desejada seja atingida. O novo modelo integrado solo-estrutura é repassado ao engenheiro estrutural, que avalia as respostas nos elementos estruturais. Caso necessite, são feitas as alterações necessárias. O modelo solo-estrutura é reprocessado até atingir uma configuração de projeto conveniente. O modelo pode ser repassado ao geotécnico que avalia a nova distribuição de esforços e recalques na fundação.



Todos os elementos são modelados com elementos lineares. O modelo mecânico utilizado é o de Winkler, este considera que, no solo junto à fundação, as tensões são proporcionais aos recalques e não existe influência entre o ponto de aplicação das tensões com a vizinhança.

É possível estabelecer dessa forma uma relação pontual entre fundação-solo, mediante a definição de uma constante de mola que representa a rigidez do maciço. Devem-se definir os valores dos módulos da reação vertical e horizontal K_v e K_h .

A AltoQi pode ajudar você a encontrar um software adequado para elaboração dos seus projetos. [Saiba mais!](#)

Conclusão

A interação solo-estrutura (ISE) é um fenômeno complexo, com muitos fatores de influência. A ISE pode ou não ter grande influência nos deslocamentos verticais e horizontais da estrutura e, portanto, no efeito P-delta e também na resposta dinâmica.

Existem vários modelos com diferente grau de complexidade para considerar a ISE. Eles vão desde o uso de um grupo de simples molas desacopladas sem massa até considerar molas e amortecedores acoplados ou modelos de elementos finitos onde pode-se modelar a não linearidade, massa, amortecimento, sequência construtiva e estratificação do solo. Em alguns casos, os parâmetros necessários para construir esses modelos são de difícil determinação e uma estimativa errada dos valores pode levar a resultados pouco confiáveis.

Em muitos casos um modelo simples — baseado em poucos e simples parâmetros e fácil de verificar ou calibrar — pode dar melhores resultados que um modelo mais complexo pouco utilizado ou verificado na prática.

Cabe ao engenheiro avaliar isto e determinar se é justificável ou não realizar o cálculo considerando a ISE. Outro ponto importante é a seleção da ferramenta de cálculo a utilizar.

Aqui é muito importante observar as possibilidades de análise de cada software e as considerações de cálculo. Existe uma enorme quantidade de trabalhos de pesquisa e publicações científicas relacionados com o tema. Naturalmente não são apresentados aqui todos os métodos de cálculo e modelos desenvolvidos. O objetivo foi apresentar as ideias fundamentais, entender o problema, e chamar atenção sobre vários pontos importantes.

[Conecte-se a minha conta no linkedin](#)





ALTO Qi

Tecnologia aplicada à engenharia